



TITLE:

Optical Interferometric Measurements  
Inspired by Time-Reversal Symmetry of  
Quantum Mechanics( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Ogawa, Kazuhisa

---

CITATION:

Ogawa, Kazuhisa. Optical Interferometric Measurements Inspired by Time-Reversal Symmetry of Quantum Mechanics. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19313>

RIGHT:

許諾条件により本文は2016-09-24に公開

|   |   |    |       |
|---|---|----|-------|
| 京都大学  | 博士（工学）  | 氏名 | 小川 和久 |
| 論文題目  | Optical Interferometric Measurements Inspired by Time-Reversal Symmetry of Quantum Mechanics<br>(量子力学の時間反転対称性を用いた光干渉測定) |    |       |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、量子もつれ光子対を利用して実現される量子光学現象および量子光計測手法を、その始状態と終状態を入れ替え、時間発展を逆にたどる「時間反転光学系」を用いることで、古典光学的な高出力光で実現する実験について論じたものである。本論文は以下の7章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景、研究目的および本論文の構成について述べている。研究背景として、まず光干渉測定には光の内部パラメータの測定と外部の物体が持つパラメータの精密測定という2種類に分類できることを述べ、それら2種類の測定は量子もつれ光子対を利用することで、より高度化、精密化が可能であることを述べている。その一方で量子光計測には光源が微弱であるという問題点あり、これを解決する手法の一つとして提案され、研究が進められている、チャープパルス干渉法（CPI）について述べている。本論文では、CPIが時間反転光学系を用いて実現される古典光学的手法の一例である点に着目し、より一般の量子光学現象についても、時間反転光学系を利用し、古典光学的に再現する手法の一般論を構築することを目的に掲げている。さらに、その手法に基づいて、興味あるいくつかの量子光計測について古典光学的再現の実験を行うことを目標としている。</p> <p>第2章では、時間反転光学系を利用して量子光学現象を古典光学的に再現する手法の一般論を論じている。本章の前半では、前提知識として量子もつれ光子対を用いて実現される量子光学現象について、いくつかの例を挙げて説明している。後半では、量子力学の時間反転の対称操作を導入して、その性質から時間反転系においても、量子もつれ光子対を用いた順方向系と同じ干渉パターンが得られることを示している。特に、時間反転系を周波数領域で考えることによって先行研究のCPIが、時間領域で考えることによって本論文で新たに提案する時間分解パルス干渉法（TDPI）がそれぞれ導出されることを示している。TDPIはCPIと比較してチャープパルス整形の不要な、より簡単な光学系で実現できる点が優れている。</p> <p>第3章ではTDPIを用いて、量子もつれ光子対を用いて実現される量子光学現象である2光子位相超分解の干渉パターンを、古典光学的に再現する実験について述べている。2光子位相超分解とは、量子もつれ光子対の干渉において干渉縞の周期が古典光の場合の1／2となる現象のことである。本実験では、TDPIの手法に従い非チャープパルスを入力光とした時間反転光学系を構築し、この光学系を用いて2光子位相超分解を示す干渉パターンを古典光学的に高い明瞭度で実現した。</p> <p>第4章では、前章で構築した時間反転2光子位相超分解の光学系を応用して、量子もつれ光子対の偏光変化に伴う幾何学的位相の非線形変化を古典光学的に観測する実験について述べている。幾何学的位相とは量子系が状態変化した際にその状態発展の経路に依存して付加する位相のことである。量子もつれ光子対の偏光変化に伴う幾何学的位相の非線形な変化は、古典光や単一光子の場合とは本質的に異なることが知られており、先行研究では量子もつれ2光子干渉計を用いて観測されてきた。本実験では、時間反転2光子位相超分解の光学系に偏光素子を追加することで、量子もつれ光</p> |   |    |       |

|   |        |    |       |
|---|--------|----|-------|
| 京都大学  | 博士（工学） | 氏名 | 小川 和久 |
| <p>子対特有の幾何学的位相の非線形変化を、高出力光源を用いて古典光学的に再現した。この実験結果は、TDPI が量子光の内部パラメータの測定に応用できることを示している。</p> <p>第 5 章では TDPI を用いて、量子もつれ光子対を用いて実現される量子光学現象である Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉、および自動分散消去の干渉パターンを古典光学的に再現する実験について述べている。HOM 干渉とは 2 光子が同時に互いに反対方向からビームスプリッタに入射した際に、必ず 2 光子まとまってどちらかのポートに出射されるという量子光学的な現象である。量子もつれ光子対の HOM 干渉には、HOM 干渉が起きていることを典型的に示す干渉パターン（HOM ディップ）の幅が偶数次の分散の影響を受けない自動分散消去という性質がある。本実験では TDPI の手法に従い非チャープパルスを入力光とした時間反転光学系を構築し、これを用いて HOM ディップおよび自動分散消去を示す干渉パターンを古典光学的に高明瞭度・高出力で実現した。</p> <p>第 6 章では、前章で構築した時間反転分散消去 HOM 干渉計を応用して、分散消去光干渉断層撮影（OCT）を古典光学的に実現する実験について述べている。OCT とは低コヒーレンスな光の干渉を利用した断層イメージング手法である。OCT においては光路上の媒質が持つ分散によってイメージングの分解能が低下するという問題がある。量子もつれ光子対の分散消去 HOM 干渉を利用する量子 OCT（Q-OCT）と呼ばれる手法では、この問題を解決できることが知られているが、Q-OCT には光源が微弱であるという別の問題がある。本実験では、古典光学的に実現できる時間反転分散消去 HOM 干渉計を利用することで、カバーガラスや硬貨の分散無依存な断層イメージングを古典光学的に高出力で実現した。本実験ではさらに工夫を加え、Q-OCT や CPI を用いた OCT で発生するアーティファクトやバックグラウンドと呼ばれるノイズを除去する手法を提案し、実験的に実現している。この実験結果は、TDPI が外部の物体が持つパラメータの精密測定に応用できることを示している。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文の成果をまとめるとともに、時間反転光学系に関する将来の展望を述べている。</p> |        |    |       |

## (論文審査の結果の要旨)

量子情報科学の発展に伴い、光の量子性を積極的に利用した光干渉測定である光量子計測の研究が盛んに行われている。光量子計測はより一般的でより精密な測定手法を提供するが、量子もつれ光子対の低い生成効率に起因する「光源の微弱性」という問題が常に存在する。本論文は、量子もつれ光子対を用いて実現される量子光計測手法を、始状態と終状態の役割を入れ換えて、時間発展を逆にたどる「時間反転光学系」を用いることで、古典光学的に高出力光源で実現する手法について論じたものである。本論文は以下の5つの内容から構成されている。

(1) 量子もつれ光子対を用いた光学系について、その時間反転光学系を構成するための一般論を構築し、その理論から新たに時間分解パルス干渉法 (TDPI) という非チャープ古典パルス光を用いる古典光学的手法を提案した。

(2) 量子もつれ光子対の干渉において、干渉縞の周期が古典光よりも短くなる現象は「2光子位相超分解」と呼ばれる。本論文では TDPI によって構築した時間反転光学系を用いることで、2光子位相超分解を示す干渉パターンを古典光学的に再現した。

(3) 量子もつれ光子対の偏光変化に伴う「幾何学的位相」と呼ばれる内部パラメータの非線形な変化は、古典光や単一光子の場合とは本質的に異なることが知られている。この変化は先行研究では量子もつれ光子対の干渉計を用いて観測されている。本実験では、2光子位相超分解を再現する時間反転光学系を応用し、量子もつれ光子対特有の幾何学的位相の非線形変化を古典光学的に観測した。

(4) 量子もつれ光子対が示す非古典的な干渉現象として、「Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉」およびその干渉パターンの「自動分散消去」が知られている。本実験では、TDPI によって構築した時間反転光学系を用いて、これらの効果を古典光学的に再現した。

(5) 量子もつれ光子対が示す分散鈍感な HOM 干渉を利用した「量子光干渉断層撮影 (Q-OCT)」には、媒質の分散による分解能の低下がないという利点があるが、微弱光のため、測定に時間がかかるという問題がある。本実験では、分散無依存な HOM 干渉パターンを再現する時間反転光学系を応用し、被測定サンプルの断層構造という外部パラメータの測定を、分散による分解能の低下なしに古典的高出力光を用いて実現した。

本論文では、量子もつれ光子対が示す量子力学的干渉パターンを、時間反転を利用して古典的に再現し、さらに量子光の内部パラメータの変化の測定、および外部パラメータの精密測定を実現した。従来、量子もつれ光子対の量子相関を利用して達成されてきた光量子計測を古典光学的に実現するという先駆的な概念を提示するとともに、実験的に扱いやすい古典光学での実現手法を確立したことは、基礎物理、応用計測の観点から重要な結果である。これらの成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工

|   |       |
|---|-------|
| 氏 名   | 小川 和久 |
| <p>学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 8 月 25 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。</p> |       |